Pablo Juan Thomasset Trakalo, IEEE PES Uruguay, Miembro Senior

Efluvios por Efecto Corona en un Generador

***Resumen* –Los generadores de la Central Hidroeléctrica Dr. G. Terra, fueron renovados entre 1994 y 1997. A los 10 años de servicio, se detecta la aparición de efluvios por efecto corona entre barras puentes de las cabezas de bobina. Evaluados los daños visualmente y mediante ensayos, se procede a licitar la reparación de los mismos, con una solución propuesta que prevendrá la aparición de nuevos efluvios.**

***Palabras clave* — Maquina rotante, generador, alternador, bobinado, devanado, aislamiento, efluvios, descargas parciales, corona, cabezas de bobina.**

I. Introducción

Los cuatro generador de la Central Hidroeléctrica Dr. Gabriel Terra (Rincón del Bonete), fueron renovados entre 1994 y 1997. Los cuatro generadores son de potencia nominal 40 MVA, tensión de salida 13,8 KV, frecuencia 50 Hz, 48 polos (velocidad 125 R.P.M.).

II. Desarrollo

A. Características de los bobinados

El bobinado es Clase F (punto mas caliente 155°C máximo), del tipo imbricado, de un solo circuito, con 2 barras de cobre tipo Roebel por ranura (total 414 ranuras). Cada barra cuenta con una envoltura o aislamiento realizado en fabrica, mediante un encintado continuo realizado en un torno. La cinta de mica es impregnada en resina epoxy termoendurecible (endurece con la temperatura), en ingles se dice que es un aislamiento "Thermoset", antes de ser aplicada a la barra Roebel.

El bobinado original de los generadores era Clase A (punto mas caliente 130°C máximo), con barras Roebel encintadas con mica y asfalto, lo que daba características termo plásticas al mismo (enblandece con la temperatura). Las barras Roebel van colocadas en las ranuras de dos, y van conectadas entre sí para formar las espiras, soldadas con placas de cobre, y protegidas por capuchas de fibra de vidrio y resina epoxy clase F, formado lo que se denomina CABEZAS DE BOBINA.

Las espiras son conectas entre si mediante los denominados PUENTES, construidos con tramos de barra Roebel de cobre encintadas de igual forma que las barras verticales del bobinado. La unión soldada de los PUENTES y las barras Roebel es aislada con cinta de mica y epoxy clase F, lo que se realiza localmente durante el montaje.

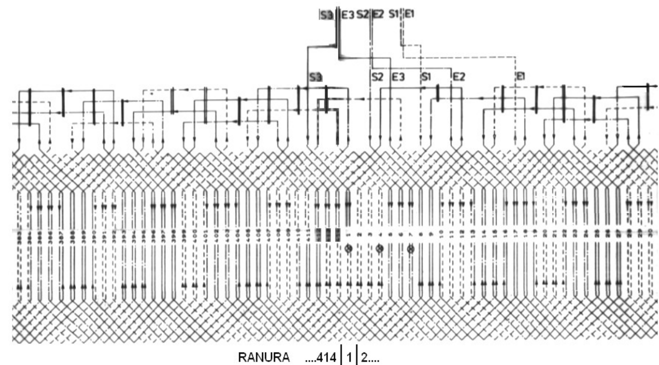


Fig. 1. Disposición de las ranuras y el devanado imbricado.

Finalmente el aislamiento de mica es protegido con un encintado de fibra de vidrio y resina poliéster, para poder realizarse las ataduras de las barras entre si, colocándose placas separadoras, las que son atadas con fieltro y cuerda tergal. El tergal es una fibra sintética de poliéster, de gran resistencia mecánica y muy resistente al desgaste.

La superficie de los puentes es pintada con BARNIZ SEMICONDUCTOR, barniz a base de resina, con alto contenido de carbón, lo que da características semiconductoras (resistencia eléctrica baja) al material, uniformizando el campo eléctrico (gradiente mínimo) en torno a las barras puente. Finalmente puentes y ataduras son pintadas con BARNIZ FINAL, barniz a base de resina con bajo contenido de carbón, lo que le características de pobre semiconductor o mal aislante.

B. Ensayos de puesta en servicio 1994-97

Durante el montaje de los generadores, se realizaron ensayos de BLACK OUT en los bobinados, la atención de los supervisores del fabricante y los controladores de obra, se centro en detectar puntos con efluvios por efecto corona en el tramo de salia de la barra de su ranura, donde es usual se produzcan efluvios. Nada indicaba que pudieran aparecer efluvios en las barras PUENTES, como se detectara 10 años mas tarde.

El ensayo de BLACK OUT TEST (ensayo de apagón), consiste en energizar Un (tensión de linea o fase-fase) una fase del bobinado a la vez, con un equipo de "Hipot en CA", (autotransformador 380/380 VCA + transformador elevador 380/50.000V) con las otras dos fases conectadas a masa y tierra. [4]

El ensayo se realiza durante la noche (mejor si no hay luna llena y ventanas por donde entre luz), con toda la iluminación interior y exterior desconectada, lo que permite visualizar a “ojo desnudo”, y a corta distancia (2 o 3 metros) los efluvios de efecto corona, los cuales emiten luz en el espectro de luz violeta y ultravioleta, lo que lo hace poco perceptible para el ojo humano.

El ensayo también puede realizarse durante el día, empleando una denominada CAMARA CORONA, la que no es mas que una cámara de filmación sensible al espectro ultravioleta. Dichas cámaras son altamente costosas, no contándose con ninguna en el país (Uruguay). Si en Brasil o Argentina, donde pueden ser arrendados los servicios de las mismas, con su operador, a un costo considerable.

C. Inspección del generador N°4

En 2006 en el generador N°4, vibraciones elevadas de frecuencia fundamental 100Hz, provocaron dos roturas en las cañerías de refrigeración del alternador, y la rotura del detector de nivel de aceite en el cojinete guiá del alternador.



Fig.2. Efluvio entre barras de distinta fase, visto desde arriba, antes de la limpieza.

En la búsqueda de causas de la vibración y otros problemas causados por la misma, se decide quitar la totalidad del techo de la carcaza, techo de la llanta del alternador, y deflectores de aire, dejando a la vista la barras puentes directamente.

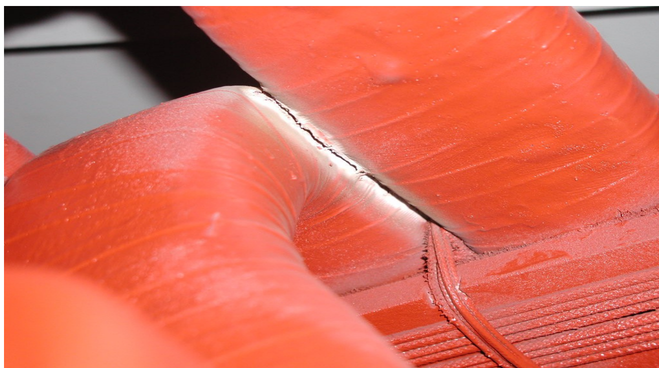


Fig.3. Efluvio entre barras de distinta fase, visto desde abajo, antes de la limpieza.

La mismas presentaban numerosas (no menos de 50) manchas de efluvios entre las mismas, polvo blanco o “white powder” característico del efecto corona en bobinados clase F. El polvo blanco, son cenizas del barniz de resina, quemados por oxidación, que produce el ozono O_2 generado por el efluvio o efecto corona en el aire.
El polvo blanco fue limpiado con papel de lija y trapo, dejando al descubierto socavaciones importantes en la capa de fieltro y cinta tergal de las barras puente.



Fig.4. Efluvio entre barras de distinta fase, luego de la limpieza.

Se desconocía la profundidad de las socavaciones, si las mismas habían llegado hasta la capa de aislamiento de mica, poniendo en riesgo la integridad del aislamiento, lo que podría finalizar en un cortocircuito fase-fase en el generador.

Un cortocircuito fase-tierra en un generador, es un cortocircuito relativamente “inocuo”, que provoca daños mínimos y fácilmente reparable, ya que el neutro de los generadores esta aterrado con una impedancia muy alta. Pero un cortocircuito fase-fase provoca corrientes del orden de decenas de kA, lo que probablemente incendiaría la totalidad del bobinado, antes de que las protección eléctricas (Relé Diferencial) y de temperatura (Contacto Térmico en el bobinado a 120°C) logren detectarlo y provoquen el disparo del generador (apertura del interruptor de 150 KV y parada de la turbina).

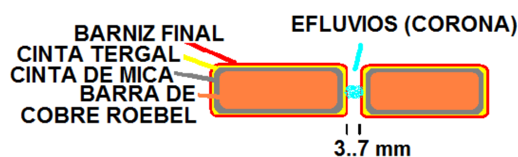


Fig.5. Efluvio entre barras.

Luego del hallazgo en el generador N°4, se inspeccionaron los generadores 1, 2 y 3, introduciendo una cámara fotográfica digital por debajo de los deflectores, y tomando numerosas fotografías. En algunas de ellas se pudo visualizar efluvios similares a los del generador N°4.

D. Antecedentes similares

Buscando antecedentes de este problema en otras centrales del mundo, encontramos la Central “Twin Falls” 2 x 13 MVA x 13,8 KV. Los dos generadores entran en servicio en 1990, en 1996 aparecen puntos con corona, en 1999 se limpia con CO2 y repara (barniza) los daños por corona. Pero en 2002 el generador #1 falla en un cortocircuito entre fases.En “Twin Falls” un indicador del problema fue la baja de la medida de resistencia de aislamiento del bobinado, y una detección temprana de descargas parciales, por un sistema de detección instalado ante sospechas de efluvios. [2]



Fig.6. Generador de Twin Falls incendiado. [2]

Lamentablemente no se tomaron medidas adecuadas y se llego al incendio de uno de los generadores. [2] La grave falla en el generador N°1 de “Twin Falls”, demuestra que es posible detectar a tiempo el problema con la inspección visual y los ensayos. También demuestra que la reparación con pintura epoxy de las superficies dañadas, no es efectiva.

E. Licitación

Inmediatamente se contacta al fabricante de los generadores para evaluar las causas y soluciones posibles. Dado que no es posible realizar una contratación directa del fabricante para reparar los bobinados, se trazan dos planes de acción; 1) limpiar los bobinados de los 4 generadores, monitoreando las descargas parciales por ensayos OFFLINE cada 5.000 horas de marcha; 2) realizar un llamado a licitación, el que se concreta en 2007.

El llamado a licitación convocaba a interesados en presentar soluciones y ejecutarlas, tanto para reparar los daños ya provocados en los bobinados, como evitar nueva aparición de efluvios en el futuro, en los mismos lugares y otros que se detectaran en los ensayos de BLACKOUT.

Se presentan tres ofertas de fabricantes de primer nivel internacional, Alstom, Siemens y Woogroup. La empresa National Coil, empresa líder en el mercado de EEUU en cuanto a investigación y reparación de bobinados de generadores, no pudo presentar su oferta en tiempo y forma, por razones propias de la empresa, pero manifestó su particular interés, y total apoyo técnico y colaboración, para resolver el problema si UTE lo requiriera.

F. Limpieza y Ensayos

Previendo que el llamado a licitación y la realización de los trabajos en los cuatro generadores, llevaría no menos de dos años en su proceso, se decide realizar un ensayo del aislamiento de cada generador y su limpieza si se consideraba necesario. El ensayo de indice de polarización con “Megger” de 5KV, no detecto ninguna anormalidad, en ninguno de los cuatro generadores, ni el indice IP fue bajo, ni bajos valores de aislamiento entre las fases y masa. Los ensayos de rampa corriente continua 0-27KV, si detectaron un problema en el generador N°3, y su mejoría luego de una limpieza de los efluvios entre barras puente.

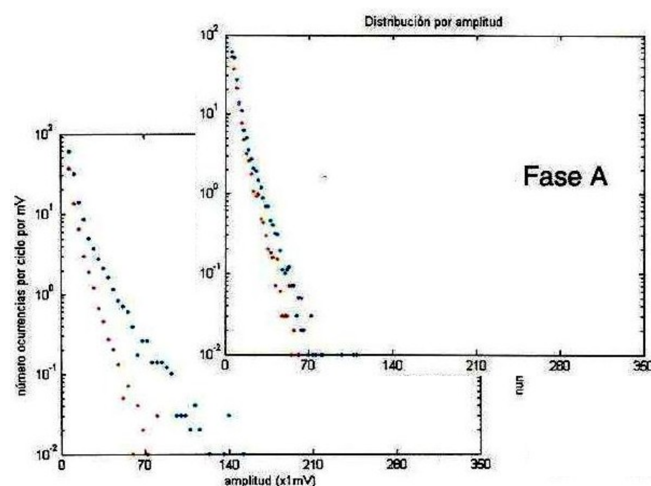


Fig.7. Descargas Parciales antes y después de la limpieza.

En este bobinado se encontró que a una tensión de 24 KVCC se disparaba la corriente de fuga (de micro amperios), indicando una posible “pinchadura” del aislamiento si se continuaba subiendo la tensión continua aplicada, hasta los 27 KVcc aplicados en el ensayo. También se realizaron ensayos de descargas parciales (ensayo en corriente alterna), a tensión aplicada 70% de la nominal 13,8KV. El bobinado del generador N°3 fue limpiado con papel de lija , trapo blanco de algodón y alcohol azul industrial, según recomendaciones del fabricante, lo que mejoro significativamente el nivel de descargas parciales y permitió realizar el ensayo de rampa de corriente continua hasta 27 KV.

Realizando una estadística de todos los ensayos realizados en los bobinados de los cuatro generadores, se puede concluir que ante un avance importante del daño por efecto corona, los niveles de descargas parciales eran aceptables en comparación con valores estándar o de referencia. La estadística también dejo en evidencia la necesidad de realizar un número mayor de ensayos de descargas parciales y ensayos de aislamiento en de corriente continua, para poder sacar conclusiones de peso.

G. Soluciones propuestas

Las soluciones propuestas en las Ofertas básicamente eran dos, 1) reparar el aislamiento dañado y pintar con barniz denominado anti-efluvios (barniz semiconductor), y 2) reparar el aislamiento dañado y rellenar las "luces" o "gaps" existentes.

La primer solución propuesta, era una solución clásica o conservadora, que todo fabricante utiliza para prevenir efluvios o corona en los bobinados, en la zona de salida de las barras de su ranura. Pero no existe evidencia teórica, ni experimental de que dicha técnica resuelva problemas de corona entre barras puentes. La segunda solución, aunque innovadora y sin referencias de aplicación en otros generadores del mundo, pero con una teoría explicando el problema y solución que la respaldara. Fue la finalmente elegida, aunque por motivos económicos y administrativos, por tratarse de una licitación pública, dando por ganadora la oferta mas económica como corresponde, siempre que la misma cumpla los requisitos y especificaciones técnicas del Pliego.

Mas tarde durante la ejecución de los trabajos, quedo demostrado que la primer solución propuesta, reparar y pintar con anti-efluvios, no era una solución aceptable. A modo de prueba se pintaron barras puentes con pintura semiconductora (anti-efluvios), sin rellenar las luces o "gaps", y luego en el ensayo de BLACK OUT, aparecía nuevamente efecto corona en es sitio o en nuevos puntos cercanos.

La solución propuesta, consistente en rellenar las luces o "gaps" con fibra y fieltro tergal embebido en resina, se basa en la teoría del problema, explicada en la referencia [1]. Las capacitancias C_A y C_B, surge entre las barras de cobre y las superficies pintadas con barniz final o semiconductor, con el aislamiento como dieléctrico. La capacitancia C_{air} surge entre las superficies de ambas barras, con el aire como dieléctrico. El valor de la capacitancia (pico-Faradios) depende del espesor de los aislamientos y su constante dieléctrica. Cualquiera sean esos valores, C_A y C_B son ordenes de magnitud mayores a C_{air}, por lo que la tensión V_{air} se acerca mucho a V_o la tensión entre barras, y si supera la rigidez dieléctrica del aire, los 3 KV/mm, se produce una descarga parcial en cada uno de los semiciclos de 50 Hz. Con el pasar de los años (unos 5 años según referencia [1]), esa pequeña descarga va quemando (debido al ozono producido) y erosionando la superfice del aislamiento.

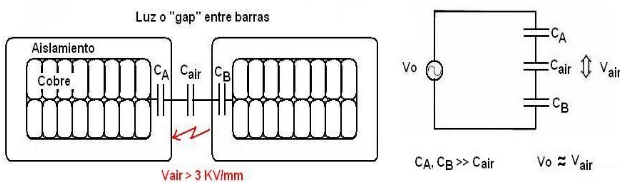


Fig.8. Capacidad entre barras y tensión de incepción.

En un bobinado de tensión nominal 13,8 KV fase-fase, en teoría aparecen efluvios en las luces o "gaps" menores a 6,5 mm (13,8 KV x 1,4142 / 3 KV/mm = 6,5 mm). En la práctica el problema es mas complejo y responde a la curva de Paschen [3].

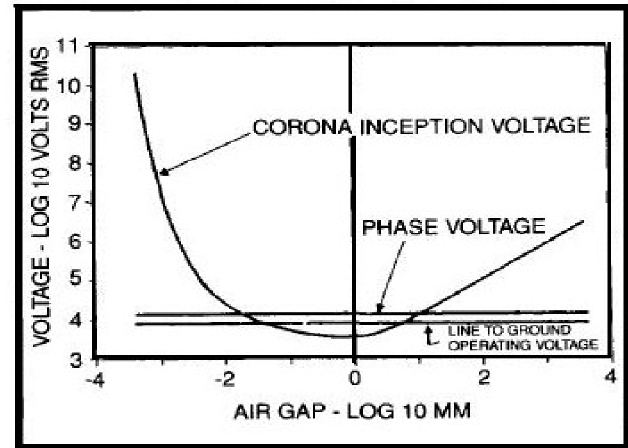


Fig. 9. Curva de Paschen.[3]

Al rellenar las luces con material aislante, se soluciona el problema porque la rigidez dieléctrica de estos materiales es unas 100 veces mayor a la del aire. Como es indicado en la Referencia [1], la propuesta de rellenar las luces o "gaps" entre barras, dejaba dudas respecto al comportamiento térmico de las barras puentes, ya que se disminuiría la superficie de disipación de calor. Pero esta preocupación fue dejada de lado, ya que los generadores de Gabriel Terra funcionan relativamente "fríos", con una temperatura promedio del bobinado de 75°C, cuando el diseño del bobinado Clase F, es para 140°C en general y 155°C para los puntos mas calientes.

La otra preocupación con la solución de relleno de los gaps, es que a largo plazo el relleno se fisure por fatiga térmica o vibración mecánica, produciendo nuevas luces, placible de generar nuevos puntos con efluvios o efecto corona. Luego en los trabajos se comprobó que la dureza y rigidez de las resinas y ataduras empleadas, hacen prácticamente imposible la aparición de movimientos y fisuras entre barras contiguas.



Fig.10. Cinta de fibra Tergal quemada por el corona, debajo esta la cinta de mica, la que no es dañada por el corona.

La dureza de las ataduras y resinas, es tal que fue necesario emplear corta-fierros o cinceles, macetas y formones, para quitar estos materiales en las zonas a ser reparadas.

El cronograma de trabajo se armo en base a las horas de marcha de las unidades, asumiendo que guardaba relación directa con el problema del efecto corona. La Unidad 2 debería ser la que tenga menor daño por los efluvios ya que esta retrasada mas de 10.000 horas respecto a las otras unidades.

H. Reparación del Generador N°4

El primer generador a ser reparado fue el N°4 por ser el que estaba sometido a vibraciones, luego el N°3, N°2 y N°1, respetándose en esta secuencia el número de horas de marcha de los mismos desde su renovación en 1994-97.
En este bobinado el técnico especialista en devanadados, comenzó realizando prospecciones en las uniones y ataduras de barras puentes, en las zonas afectadas y en las zonas no afectadas, con el fin de comparar el estado de los materiales, la profundidad de los daños, entrada de humedad por las socavaciones o por el envejecimiento normal del bobinado.

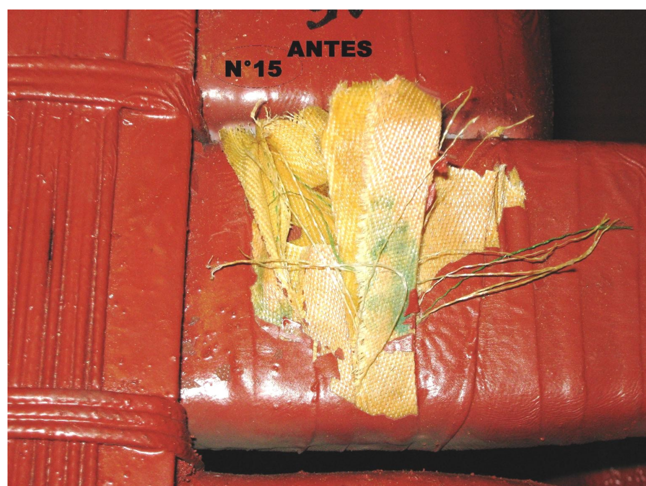


Fig.11. Barra desencintada donde se ve un principio de sulfatación.

En uno de los puntos se hallaron machas de sulfato de cobre, lo que indica que humedad ha penetrado al aislamiento y llegado al cobre de las barras puente.

I. Control de Obra

Se realizo un control de obra y seguimiento, tanto técnico como administrativo de los trabajos, por parte de UTE, con un técnico Controlador de Obra , los ingenieros de la Central Hidroeléctrica y de las oficinas de Montevideo. El controlar de obra consistió en un relevamiento y mapeo de los efluvios encontrados, por el rastro de polvo blanco encontrado, las socavaciones del aislamiento y los hallazgos de los ensayos de BLACK OUT.

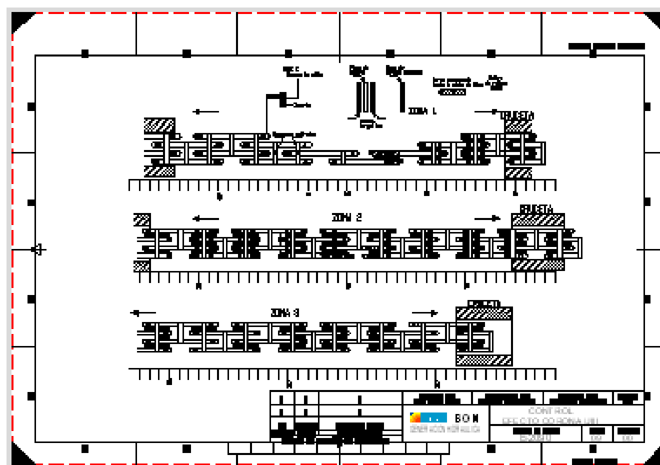


Fig.13. Mapeo de los efluvios en las barras puentes.

Para ello se dibujo un esquema de la topografía de los puentes, donde se identifico cada uno de los efluvios, referenciandolos con el número de la ranura, se indicaron todos los trabajos de reparación realizados. En el comienzo entre las ranuras 10 y 130 donde el daño era mayor, luego en la mitad del bobinado ranuras 10 a 220, ya que se encontró en el generador N°3 nuevas barras afectadas entre las ranuras 130 y 220.

J. Calidad, Seguridad y Medio Ambiente

Todos los trabajos se realizaron según crono gramas de trabajo y procedimientos escritos y aprobados por UTE, presentados en la oferta primero, discutidos entre el Contratista y técnicos de UTE después. Los materiales empleados contaban todos con sus fichas técnicas y hojas de seguridad.



Fig.13. Encintado y barnizado.

Los operarios del Contratista trabajaron todos con los elementos de protección personal necesarios (casco, guantes, mascara, gafas). Los residuos producidos por los trabajos fueron mantenidos en contenedores separados de los residuos habituales de la Central Hidroeléctrica, para su posterior disposición final debidamente envasados.

K. Generadores 3, 2 y 1.

En comparación con el generador N°4, en los de mas generadores se encontró aislamientos en mejor estado que en el N°4. A pesar de contar con mayor número de horas de marcha el generador N°3, no tiene niveles de vibraciones como el N°$, lo que probablemente haya contribuido a la aceleración del daño pro corona del generador N°4.

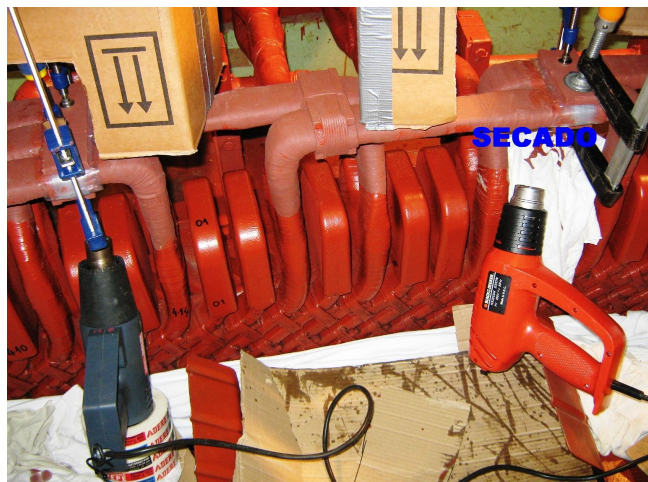


Fig 14. Secado de los barnices.

Los trabajos de reparación del bobinado demandaron unas 3 semanas en el generador N°4, para luego optimizarse en 2 semanas en los demás generadores, una vez que el técnico bobinador y el personal mejoraron la técnica del trabajo. En la práctica las cuatro unidades estuvieron detenidas 4 semanas, debido a otros problemas encontrados durante el mantenimiento de las turbinas, pero siempre en cumplimiento de los plazos acordados previamente entre UTE y el Contratista.

L. Ensayo con cámara corona

En el generador N°1, complementariamente al ensayo BLACK OUT de aceptación de los trabajos, se realizo un ensayo con una cámara corona (ultravioleta). Servicios prestados por una empresa argentina, especializada en el monitoreo de efecto corona en lineas de alta tensión. La pantalla de la cámara muestra "chipas" en el espectro ultravioleta, traducidas por la cámara al espectro visible para el ojo humano. También muestra un conteo que permite cuantifica la intensidad de los efluvios por corona.



Fig 15. Inspección con cámara corona.

III. Conclusiones

El problema de efluvios por efecto corona, es un problema importante, que no puede ser menospreciado. En el caso de los generadores de Gabriel Terra, el problema fue detectado a tiempo, antes de que el deterioro del aislamiento fuese irreversible, o se acelerará el deteriror llegando a la falla. En cuanto a la causa del problema, si bien el proyecto del bobinado en fábrica, previo dejar una luz o gap de 5 mm entre barras, los proyectistas olvidaron que los 5 mm deben tener en cuenta el encintado final de la barras.

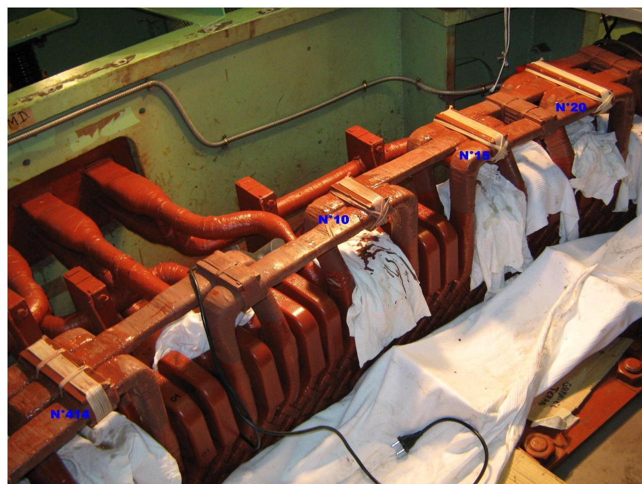


Fig 16. Pintura preliminar con barnices.

IV. Referencias

[1] Libro; "Electrical Insultation for Rotating Machines, Design, Installation, Aging, Testing, And Repair". Greg C. Stone, Edward A. Boulter, Ian Culbert, and Hussein Dhiran. Ver página 168, "INADEQUATE END-WINDING SPACING".

[2] Twin Falls Hydro Project, 13 MW 13,8 KV Generator Failure, NWHA Technical Workshop. www.nwhydro.org/events_committees/Docs/Twin_Falls_Hydro_**Generator**_Failure.pdf

[3] "Corona Deterioration Reduction in Large Electrical Machine Insulation". R.H. Rehder and M.E. Stutt. IEEE Industry Applications Magazine. January/Febrary 1995.

[4] IEEE Std 1434-2000, Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery,

V. Biografía



Pablo Juan Thomasset Trakalo, nacido en Montevideo, Junio 27 de 1967. Graduado como Ingeniero Electricista en 1991 en la Universidad de la República. Experiencia laboral en telecomunicaciones en la empresa Ringer S.A., 1991-92. Ayudante de ingeniero en la consultoría y Proyecto de Renovación Gabriel Terra en UTE, en 1993. Supervisor de Obras Electro técnicas en la Obra de la Renovación de la Central Hidroeléctrica Dr. Gabriel Terra, 1994-97. Jefe de Dpto. Electrotécnico de Obras y Proyectos desde 1998 a 2005. Jefe de Dpto. de Mantenimiento de la Central Hidroeléctrica Dr. Gabriel Terra desde 2006. Docente de las materias Laboratorio de Electromecánica y Gestión de Mantenimiento, en la carrera de Bachillerato en Electromecánica de la Escuela Técnica Paso de los Toros. Socio de la AIU (Asociación de Ingenieros del Uruguay), Miembro fundador de la rama estudiantil del IEEE en 1989, y Miembro Profesional del IEEE desde 1991. Miembro Senior del IEEE desde 2004. Actual Vicepresidente del PES en Uruguay, Capítulo de Potencia de la Sección IEEE Uruguay 2010.